

Méthode de caractérisation hydraulique des sols compactés à l'aide du filtre presse

Andry Rico RAZAKAMANANTSOA, Gilles BARAST, Irini DJERAN-MAIGRE

Laboratoire de Génie Civil et d'Ingénierie Environnementale (LGCIE), INSA de Lyon, Université de Lyon,
Domaine Scientifique de la Doua, Bât. Coulomb, 36 Avenue des Arts, 69621 VILLEURBANNE CEDEX

Résumé :

Une étude hydraulique avec le filtre presse a été effectuée sur des matériaux compactés. L'objectif consiste à étudier l'application d'une méthode graphique utilisée initialement pour les suspensions ainsi que d'une méthode analytique proposée, pour déterminer le coefficient de perméabilité des géomatériaux soumis à des sollicitations hydrauliques croissantes imposées. Les résultats montrent que la méthode analytique proposée donne des résultats proches de la valeur de référence définie par la loi de Darcy.

Abstract:

Hydraulics' test with filter press was performed with compacted soil. Graphical method initially used for bentonite suspension and developed analytic method are proposed in order to assess the hydraulic conductivity of geomaterial subjected to growth hydraulic stress. Test result shows the possibility to use the analytic method deal to value obtained with Darcy's law, used as reference.

Mots clefs : indicateur de performance, perméabilité, filtration

1 Introduction

La performance hydraulique des barrières d'étanchéité en fond des installations de stockage de déchets est assurée par des matériaux de faible perméabilité (géosynthétique bentonitique, géomatériaux compactés). Les géomatériaux compactés sont constitués essentiellement par des matériaux naturels en place et le plus souvent traités à la bentonite. Ils jouent un rôle important dans la préservation de l'environnement [2] [6]. Ils sont soumis en permanence à divers types de sollicitation : hydraulique (lixiviation); mécanique (tassements différentiels) ; chimique (transfert de masse, diffusion des polluants).

Actuellement, les essais de caractérisation hydraulique utilisés en laboratoire pour les sols compactés, basés sur la loi de Darcy, sont relativement longs (jusqu'à plusieurs mois). Des indicateurs sont alors utilisés pour estimer rapidement la performance hydraulique des géomatériaux compactés (indice de gonflement, fraction argileuse, rhéologie ...) [1]. Mais ces indicateurs ne permettent qu'une appréciation qualitative de la performance hydraulique des sols.

D'après la littérature, le filtre presse permet de réaliser des essais de courte durée afin d'étudier le comportement hydraulique des suspensions argileuses [1] [3] [5]. Plusieurs méthodes de calcul associées à ces essais sont développées. Celles-ci sont basées sur la détermination graphique d'un paramètre qui permet de déterminer le coefficient de perméabilité de la suspension argileuse [4] [5].

La présente étude a été réalisée dans le but de transposer la méthode du filtre presse utilisée pour les suspensions argileuses, au sol compacté. Pour cela le travail a été effectué comme suit:

- détermination des caractéristiques hydrauliques d'un sol compacté à l'aide de la loi de Darcy ;
- application directe de la méthode graphique utilisée pour les suspensions, au sol compacté ;
- amélioration de la méthode sur les suspensions, prenant en compte l'épaisseur du matériau et permettant ainsi la détermination analytique du coefficient de perméabilité avec plus de précision ;
- comparaison entre les résultats issus des trois méthodes (Darcy, méthodes graphique et analytique).

2 Matériaux et fluide d'essai

Le géomatériau est constitué par un mélange :

- de sol sableux, dont les caractéristiques à l'optimum Proctor sont les suivants : poids volumique sec égal à $17,4 \text{ kN/m}^3$ avec une teneur en eau de 11,5 %.
- d'une bentonite calcique activée, dont la concentration est égale à 3,5% la masse sèche du sol.

Le mélange est ramené à la teneur en eau optimale du sol seul puis conditionné dans une enceinte fermée hermétiquement durant 24 heures. Cette opération permet d'assurer l'hydratation des feuillets de la bentonite ainsi que l'homogénéité de la teneur en eau du mélange.

Le fluide d'essai est constitué par de l'eau faiblement minéralisée (1.10^{-3}M de NaCl).

3 Méthode et instrumentation

La masse du mélange nécessaire à la conduite de l'essai est déduite à l'aide du poids volumique sec du sol seul et de l'épaisseur initiale du matériau fixée ici à 1 cm. La quantité de matériau calculée est versée dans la cellule cylindrique du filtre presse et compacté à l'optimum du Proctor normal du sol seul. Cette opération est réalisée à l'aide d'une presse mécanique. L'épaisseur ainsi que le poids volumique du mélange compacté seront supposés constant jusqu'à la fin de l'essai.

Des papiers filtre sont disposés à l'embase et au dessus du matériau. Le fluide d'essai est ensuite versé progressivement sur l'échantillon jusqu'au remplissage complet de la cellule. Un bouchon étanche vient se positionner au sommet de la cellule de filtration. Ce dernier est ensuite connecté au réseau d'air comprimé muni de manomètre de contrôle de pression. Un récipient placé sous le tube de drainage permet de collecter le percolât, et finalise le montage de l'appareillage.

Quatre valeurs de pression ont été choisies (150, 200, 250 et 300 kPa) et appliquées d'une manière croissante pour assurer une consolidation progressive du matériau. L'essai débute lorsque la pression d'air est ajustée à la valeur souhaitée. Le percolât est pesé au cours du temps à l'aide d'un système d'acquisition de donnée.

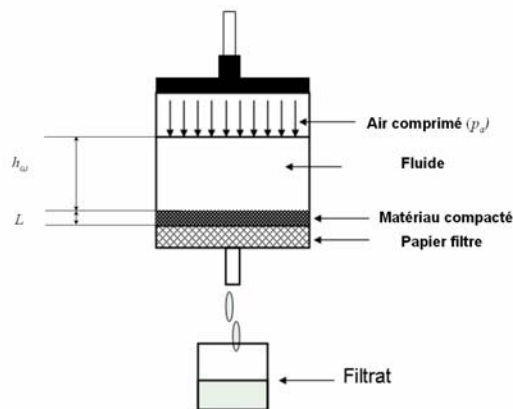


FIG. 1 – Principe de l'essai de filtration sur matériau compacté.

L'expression de la pression appliquée sur le matériau compacté décrite par Filtz [4], s'écrit:

$$p_o = p_a + h_w \gamma_w \quad (1)$$

Où, la pression p_o représente la pression globale appliquée sur le matériau. Elle est fonction de la pression d'air appliquée en tête de la cellule p_a (kPa) et de la charge hydraulique $h_w \gamma_w$ (kPa), où h_w (m) : hauteur du fluide et γ_w : poids volumique de l'eau (kN/m^3).

Le coefficient de perméabilité globale k_c qui représente la perméabilité moyenne du matériau que l'on cherche à déterminer peut être obtenue avec l'équation (2) [3] [4] [5].

$$k_c = k_o \left(\frac{p_o}{p_{ref}} \right)^{-\alpha} \quad (2)$$

Où p_{ref} est une pression de référence unitaire (kPa). k_o désigne le coefficient de perméabilité calculé à l'aide du volume d'eau percolé à travers le matériau sous une pression p_o . Notons que $k_c = k_o$ lorsque $p_o = p_{ref}$.

4 Résultats et analyses

La méthode utilisée pour la suspension (décrite au paragraphe 3), montre qu'il est possible de déterminer un coefficient de perméabilité moyenne qui est fonction d'un coefficient α . Dans le chapitre qui suit, nous nous attacherons à appliquer puis modifier cette méthode sur un matériau compacté. Au préalable, une valeur de référence sera déterminée à l'aide de la relation linéaire découlant de la loi de Darcy, afin de comparer les résultats obtenus avec les deux méthodes.

4.1 Détermination du coefficient de perméabilité de référence ($k_{c\ Darcy}$)

Le flux d'infiltration F pour chaque gradient hydraulique au travers du géomatériau est calculé à partir de la relation suivante :

$$F = \frac{dV}{A \times dt} \quad (3)$$

$$i = \frac{P_o}{\gamma_w \times L} \quad (4)$$

A représente l'aire de la cellule, V le volume de fluide infiltré pour un instant t . Le gradient hydraulique i est fonction de la pression appliquée p_o , en considérant que l'épaisseur L de l'échantillon est constante.

La courbe représentative du flux d'infiltration en fonction du gradient hydraulique du matériau compacté permet de déterminer le coefficient de perméabilité de référence noté $k_{c\ Darcy}$, obtenu en appliquant la loi de Darcy (figure 2).

$$F = k_{cDarcy} \times i \quad (5)$$

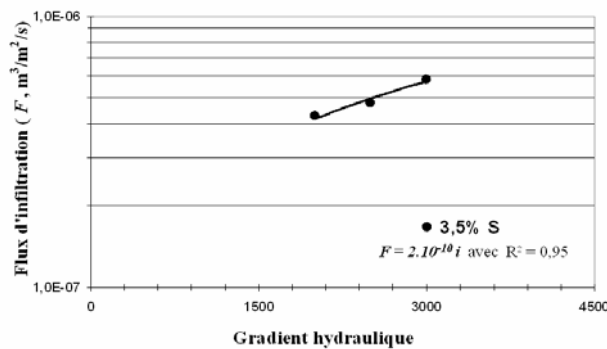


FIG. 2 – Evolution du flux en fonction du gradient hydraulique.

La valeur du coefficient de perméabilité déduite à l'aide de la figure 2, montre que le coefficient de perméabilité $k_{c\ Darcy}$ correspondant à ce matériau est égal à 2.10^{-10} m/s, avec un gradient i minimal égal à 2000. Soit un ordre de grandeur de différence par rapport celui obtenu par Couradin et al. [2] à l'aide d'un perméamètre à parois rigide ($k = 1.10^{-9}$ m/s, $i = 36$), avec le même matériau. Cette différence pourrait être associée à la différence de charge hydraulique appliquée [3]. Ce mode de détermination est la méthode classique utilisée pour l'obtention du coefficient de perméabilité des géomatériaux compactés. On s'attachera donc à considérer cette valeur comme référence pour la suite de l'étude. On remarquera que l'obtention de la valeur du coefficient hydraulique nécessite : l'hypothèse d'une épaisseur constante, l'imposition de 3 charges hydrauliques, ce qui est relativement long.

Ces deux considérations justifient la recherche d'autres méthodes de détermination du coefficient de perméabilité. On étudiera deux autres méthodes basées sur la détermination du coefficient défini d'après l'équation (1) par :

- la méthode graphique développée par Chung et Daniel [3] dans le paragraphe 4.2.
- et une méthode analytique proposée dans le paragraphe 4.3.

4.2 Détermination du coefficient de perméabilité k_{cg} par la méthode graphique

En régime permanent, l'essai de perméabilité effectué avec une pression globale p_o devrait donner une valeur de perméabilité k_o . Dont les résultats sur le matériau compacté sont récapitulés dans le tableau (1).

TAB. 1 – Conductivité hydraulique k_o en fonction des pressions p_o appliquée.

Pression p_o (kPa)	150	200	250	300
k_o (m/s)	$2,88.10^{-10}$	$2,34.10^{-10}$	$1,91.10^{-10}$	$1,56.10^{-10}$

D'après l'équation (2), le coefficient α est l'inconnue principale, qui donnerait accès à l'étude hydraulique. Selon Fox et al. [5], ce coefficient peut être déterminé graphiquement à partir de la pente de la courbe $\log_{10} k_o : f(\log_{10} p_o)$ (figure 3) [3] [4] [5]. Le coefficient α est alors égal à $\alpha = -0,88$ pour ce présent étude.

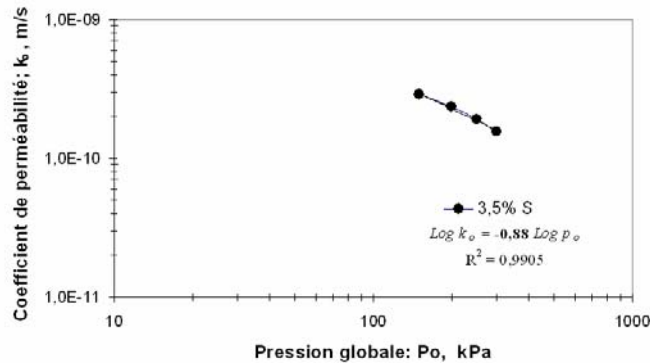


FIG. 3 – $\log_{10} k_o : f(\log_{10} p_o)$ pour déterminer le coefficient α .

Cette méthode ne prend pas en compte l'épaisseur du matériau. Le coefficient de perméabilité obtenu noté k_{cg} est calculé à l'aide de l'équation (2). En utilisant les données du tableau 1. On obtient ainsi le tableau 2.

TAB. 2 – Coefficient de perméabilité k_{cg} obtenu avec la méthode graphique.

Pression p_o (kPa)	150	200	250	300
k_{cg} (m/s)	$2,37.10^{-8}$	$2,48.10^{-8}$	$2,46.10^{-8}$	$2,36.10^{-8}$

Le tableau 2 montre que les valeurs des coefficients de perméabilité k_{cg} , obtenues avec le paramètre α pour différentes pressions sont de l'ordre de $2,4.10^{-8}$ m/s, soit 10^{-2} de différence par rapport à la valeur de référence. Dans ce cas, cette méthode de calcul semble sous estimer la valeur réelle du coefficient de perméabilité.

4.3 Détermination du coefficient de perméabilité k_{ca} par la méthode analytique

Le sol compacté se différencie de la suspension bentonitique compte tenu de la prise en compte de l'épaisseur de l'échantillon. Dans notre étude, rappelons que cette épaisseur est considérée constante.

L'approche analytique se base sur la loi de Darcy, celle-ci a été décrite par Rushton [7] par l'équation (6).

$$\frac{dV}{dt} = \frac{k_{ca} p_o}{\gamma_w L} A \quad (6)$$

Avec V : le volume de filtrat (m^3), t : durée d'infiltration (s), p_o : pression globale appliquée ($p_o : p_a$ pression d'air + charge hydraulique $h_o \gamma_o$) (kPa), A : aire du filtre (m^2), L : épaisseur du cake, k_{ca} : conductivité

hydraulique globale du cake (m/s) obtenue avec la méthode analytique, γ_w : poids volumique de l'eau (kN/m^3) ; i représente le gradient hydraulique exprimé en fonction de la pression globale appliquée.

L'épaisseur du matériau compacté a été supposée constante dans le temps et le matériau saturé durant tout l'essai. L'expression de k_{ca} dans l'équation (6) peut être substituée par son expression équivalente décrite dans l'équation (1) de Chung et Daniel [3].

L'équation (6) devient :

$$\frac{dV}{dt} = k_o p_o^{-\alpha} i A \quad (7)$$

Avec une simple intégration

$$\int_o^v dV = \int_o^t (k_o p_o^{-\alpha} i A) dt = (k_o p_o^{-\alpha} i A) t \quad (8)$$

L'expression analytique de α s'obtient à partir de l'équation (8) en passant par une transformation en fonction logarithmique. D'où

$$\alpha = \frac{\log_{10} \frac{\gamma_w L V}{k_o A p_o t}}{\log_{10} p_o} \quad (9)$$

L'épaisseur de l'échantillon a été mesuré à la fin de l'essai et est égale à $L = 1$ cm. Le coefficient α est ensuite déterminé grâce à l'équation (9). Ce coefficient α est inversement proportionnelle a la pression appliquée, et donne des valeurs dix fois plus petit que celui obtenu graphiquement avec la précédente méthode. Les coefficients de perméabilité et les coefficients α correspondants à chaque pression sont récapitulés dans le tableau 3.

TAB. 3 – Coefficient de perméabilité k_{ca} obtenu avec la méthode analytique

Pression p_o (kPa)	150	200	250	300
α	-0,04	-0,02	-0,03	-0,05
k_{ca} [m/s]	$3,57.10^{-10}$	$2,67.10^{-10}$	$2,25.10^{-10}$	$2,06.10^{-10}$

Bien que les valeurs du coefficient calculées obtenu pour chaque pression soient différentes, elles sont toutes de l'ordre de grandeur de k_{cDarcy} . De plus, la méthode permet d'intégrer l'épaisseur de l'échantillon dans le calcul. Cette méthode peut donc être initiée comme indicateur de performance hydraulique des sols compactés.

5 Comparaison des différentes méthodes

Les différents coefficients de perméabilité obtenus avec les méthodes précédentes sont récapitulés dans le tableau 4.

TAB. 4 – Paramètre hydraulique k_c correspondant aux différentes méthodes

Méthode	k_{cDarcy} [m/s]	k_{cg} [m/s]	k_{ca} [m/s]
Coefficient de perméabilité	$2,10^{-10}$	$\sim 2,4. 10^{-8}$	$[3,75.10^{-10} - 2,06. 10^{-10}]$

La détermination graphique du paramètre α nécessite la réalisation d'au moins trois essais, avec différentes pressions, tout comme la méthode de Darcy. On constate que les valeurs des coefficients de perméabilité obtenues sont proches du coefficient de perméabilité de référence obtenu avec Darcy (k_{cDarcy}) sauf elles obtenues avec la méthode graphique. De plus, la méthode de détermination graphique du paramètre α ne

permet pas d'apprécier l'épaisseur de l'échantillon, ce qui limite l'application de la méthode au cas où l'épaisseur du matériau est supposée constante et n'évolue pas dans le temps.

Les résultats préliminaires obtenus avec la méthode analytique montre que la valeur du coefficient de perméabilité k_{ca} est proche et de même ordre de grandeur que la valeur de référence obtenue avec Darcy ($k_{cDarcy} = 2.10^{-10}$ m/s). Cette nouvelle approche présente l'avantage de pouvoir prendre en compte l'épaisseur du matériau dans le calcul. De plus, contrairement aux précédentes méthodes, on voit apparaître un gain de temps pour la réalisation de l'expérimentation. Le nombre d'essai à effectuer peut se réduire à un seul essai, sous une seule pression. Dans ce cas, cela facilite la prise en compte de la répétitivité de l'essai.

La différence entre les valeurs de coefficient de perméabilité obtenu par la méthode analytique (k_{ca}) et celle de Darcy (k_{cDarcy}) pourrait être associée à la variation de l'épaisseur de l'échantillon en fonction de la pression appliquée. Dans une perspective d'amélioration de la méthode, il serait alors intéressant de remettre en cause l'hypothèse de l'épaisseur constante.

6 Conclusion

La méthode graphique proposée dans la littérature, utilisée pour les suspensions, a été appliquée aux sols compactés. Cette méthode montre qu'il est possible de calculer un coefficient de perméabilité k_{cg} , à l'aide d'un coefficient α déterminé graphiquement. Cependant, la détermination graphique du paramètre de calcul ne permet pas d'apprécier l'épaisseur de l'échantillon. Le coefficient de perméabilité obtenu sont de l'ordre de $2,4.10^{-8}$ m/s soit un écart de 10^{-2} par rapport à la valeur de référence ($k_{cDarcy} = 2.10^{-10}$ m/s).

Le résultat du coefficient de perméabilité ($k_{ca} : [3,75.10^{-10} - 2,06. 10^{-10}]$) obtenu avec la méthode analytique est de même ordre de grandeur que la valeur de référence (k_{cDarcy}). L'écart négligeable entre les coefficients de perméabilités obtenus nous permet de considérer que le résultat obtenu est assez satisfaisant pour initier la méthode comme indicateur de performance hydraulique des géomatériaux compactés. De plus, la méthode de détermination analytique du coefficient α permet non seulement d'intégrer l'épaisseur de l'échantillon mais en plus de réduire le nombre d'essai à effectuer sous une seule pression.

La méthode développée avec le filtre presse permet donc de compléter les indicateurs de performance hydraulique existants grâce à la détermination d'un coefficient de perméabilité dans un temps court. L'essai au filtre presse pour les sols compactés peut ainsi servir à prévoir la mise en place des essais de longue durée classiques. De plus, la méthode analytique développée offre également la possibilité d'intégrer l'influence de la contrainte mécanique réelle à laquelle le matériau sera soumis in situ.

7 Références

- [1] Barast G., Razakamanantsoa, A., Djeran-Maigre, I., Didier, G., Couradin, A., Etude de la Filtration et de la Rhéologie pour caractériser les bentonites calciques activée. *JNGG*, Nantes, 483-490, 2008.
- [2] Couradin, A., Razakamanantsoa, A., Didier, G., Djeran-Maigre, I., Etude comparative de performance hydraulique d'adjuvant argileux en traitement de sol. *JNGG*, Nantes, 53 – 60, 2008.
- [3] Chung, J., Daniel, D., Modified fluid loss test as an improved measure of hydraulic conductivity for bentonite. *Geot. Testing J.*, 31, n°. 3, 243 – 251, 2008.
- [4] Filtz, G., Henry, L., Heslin, G., Davidson, R., Determining hydraulic conductivity of soil bentonite using the API filter Press. *Geot. Testing Journal, ASTM*, March, 24, n°1, 61 – 71, 1997.
- [5] Fox, P., Baxter, C., Consolidation properties of soil slurries from hydraulic consolidation test. *J. Geotech. Geoenviron.* 123, n°8, 770 – 776, 1997.
- [6] Razakamanantsoa, A., Barast, G., Djeran-Maigre, I., Couradin, A., Didier, G., Performance hydraulique en présence de différent fluide d'un sol traité à la bentonite renforcé par ajout de polymère. *JNGG*, Nantes, 133 -140, 2008.
- [7] Rushton, A., Ward, A., Holdich, R., Solid liquid filtration and separation technology, 2nd Ed., Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim, 2000.